

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	III
Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	2
2.1 Spanende Mikrobearbeitung	2
2.1.1 Mikrofräsen	2
2.1.2 Mikroschleifen	4
2.2 Werkzeugmaschinen für die spanende Mikrobearbeitung	5
2.3 Werkzeugspindeln für die spanende Mikrobearbeitung	6
2.3.1 Spindelantriebe	8
2.3.2 Spindellagerungen	12
2.3.3 Werkzeugspannsysteme	15
2.3.4 Stabilität luftgelagerter Werkzeugspindeln	16
2.4 Strömungsmechanische Grundlagen bei der Auslegung kompakter Luftlagerspin-	
deln	20
2.4.1 Grundgleichungen der Strömungsmechanik	20
2.4.2 Turbulenz und Turbulenzmodellierung	21
2.4.3 Diskretisierung	24
2.4.4 Beschreibung der Strömungsmechanik in Luftlagern	26
2.5 Zusammenfassende Bewertung	32
3 Forschungsbedarf und Zielsetzung	34
3.1 Motivation	34
3.2 Zielsetzung	34
3.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	35
4 Numerische Strömungssimulation aerostatischer Lager	37
4.1 Numerische Simulation von Einlassströmungsvorgängen in Luftlagern	37
4.1.1 Berechnung der Speisekenngrößen mittels numerischer Strömungssimulation	38
4.1.2 Einlassströmungssimulationsmodell (ESSM)	40
4.1.3 Validierung der CFD Simulation und des ESSM mittels Referenzdaten	46
4.1.4 Einfluss von Lagergeometrie und Versorgungsdruck auf Lager- und Spei-	
sekenngrößen	47
4.2 Numerische Berechnung der Lagerkenngrößen	49
4.2.1 Stationäres Lagermodell	51
4.2.2 Dynamisches Lagermodell	56
4.2.3 Validierung des numerischen Simulationsmodells	61
4.3 Fazit und Modellgrenzen	65

5	Numerische Strömungssimulation von Antriebsturbinen kompakter Luftlagerspindeln	67
5.1	Auslegung der Turbine	67
5.1.1	Leistungsbedarf der Turbine	67
5.1.2	Fertigungstechnische Einschränkungen	69
5.2	Numerische Strömungssimulation	70
5.2.1	Modellerstellung	70
5.2.2	Solvereinstellungen und Randbedingungen	71
5.2.3	Simulationsergebnisse	74
5.3	Fazit	82
6	Rotordynamik kompakter Luftlagerspindeln	83
6.1	Bewegungsgleichung starrer Rotoren	83
6.2	Berechnung der Eigenfrequenzen und Eigenformen	85
6.3	Untersuchung dynamischer Eigenschaften von Luftlagerspindeln mittels Zustandsraumdarstellung	87
7	Versuchstechnik und -analytik	90
7.1	Verwendete Maschinensysteme	90
7.1.1	LT Ultra MTC 250	90
7.1.2	Nano Grinding Center (NGC)	90
7.1.3	Micro Milling Center (MMC)	91
7.2	Eingesetzte Werkzeuge und Werkstücke	92
7.3	Rotor- und Statorvermessung	93
7.4	Prüfstand	93
8	Simulative und experimentelle Untersuchungen	95
8.1	Charakterisierung der Werkzeugrohlinge	95
8.2	Luftgelagerte Rundachse zur Herstellung von Mikroschaftwerkzeugen	95
8.2.1	Aufbau	96
8.2.2	Integration, Charakterisierung und Werkzeugherstellung	97
8.3	Kompakte, einlassgedrosselte Luftlagerspindel	99
8.3.1	Aufbau und Fertigung	99
8.3.2	Stabilitätsuntersuchungen	102
8.3.3	Messtechnische Charakterisierung und Validierung der Simulationsergebnisse	105
8.4	Kompakte, auslassgedrosselte Luftlagerspindel	106
8.4.1	Aufbau und Fertigung	106
8.4.2	Stabilitätsuntersuchungen	108
8.4.3	Messtechnische Charakterisierung und Validierung der Simulationsergebnisse	110
8.5	Mikrofräsversuche	112
8.6	Fazit der simulativen und experimentellen Untersuchungen	114
9	Zusammenfassung und Ausblick	115
10	Quellenverzeichnis	119
	Anhang	127